

**DETERMINACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES, MEDIANTE  
ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA EFECTUAR LA AMENAZA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO NEGRO,  
DEPARTAMENTO CUNDINAMARCA**



**VIVIANA CAROLINA DÍAZ GARNICA**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

**ESPECIALISTA EN GEOMÁTICA**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA**

**BOGOTÁ, JUNIO DE 2019**

# DETERMINACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES, MEDIANTE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA EFECTUAR LA AMENAZA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO NEGRO, DEPARTAMENTO CUNDINAMARCA

DETERMINATION OF TORRENTIAL FLOOD HAZARD AREAS, BY MEANS OF MULTICRITERIA ANALYSIS TO CARRY OUT THE THREAT IN THE UPPER BASIN OF THE NEGRO RIVER, CUNDINAMARCA DEPARTMENT

**Viviana Carolina Díaz Garnica**  
Ingeniero Geógrafo y Ambiental  
Especialización en Geomática  
Universidad Militar Nueva Granada  
Bogotá, Colombia  
u3101437@unimilitar.edu.co

## ABSTRACT

This article presents the evaluation of torrential flood hazard areas in the upper part of the Negro river hydrographic basin, in the department of Cundinamarca, based on a multicriteria analysis. The estimation of torrential hazard areas was carried out using GIS and remote sensing techniques, combined with the physical characteristics of the basin, geomorphological and meteorological data. The results obtained allowed to identify the parts of the upper basin of the Negro River, which have a high potential to generate torrential flow events, taking into account the morphometric analysis carried out and the behavior of the rains in that area.

## RESUMEN

En este artículo se presenta la evaluación de áreas de amenaza por avenidas torrenciales en la parte alta de la cuenca hidrográfica del río Negro, en el departamento de Cundinamarca, a partir de análisis multicriterio. La estimación de áreas de amenaza por avenidas torrenciales, se llevó a cabo utilizando técnicas SIG y de percepción remota, combinadas con las características físicas de la cuenca, datos geomorfológicos y meteorológicos. Los resultados obtenidos permitieron identificar las partes de la cuenca alta del río Negro, que presentan un alto potencial para que se generen eventos de flujos torrenciales, teniendo en cuenta el análisis morfométrico realizado y el comportamiento de las lluvias en esa zona.

**Palabras clave** Avenida Torrencial · Río Negro · Morfometría · Modelo Digital de Elevación · Amenaza

## 1 Introducción

Las avenidas torrenciales entendidas como “crecidas repentinas producto de fuertes precipitaciones que causan aumentos rápidos del nivel de agua de los ríos y quebradas de alta pendiente, las cuales pueden ser acompañadas por flujo de detritos de acuerdo a las condiciones de la cuenca” [1]. Son fenómenos naturales que anualmente generan pérdidas humanas y económicas para distintas regiones del país, por su poder de destrucción, es de gran importancia en la evaluación de riesgos naturales. Es por eso que, el análisis de este fenómeno ha sido incluido en los instrumentos de planeación como las Evaluaciones Regionales del agua [2].

Existen diferentes razones, por la cuales el fenómeno de avenida torrencial puede ser tan dañino, pero la principal razón consiste en la dificultad en su predicción por la rapidez con la que ocurre y su corta duración [3].

En varios estudios se han desarrollado diferentes metodologías para poder establecer las características físicas de la cuenca hidrológica, y así establecer el grado de amenaza que esta presenta. La descripción de las características hidrográficas de una cuenca es un aspecto fundamental para el desarrollo de los proyectos de gestión de recursos hídricos, es por eso que la determinación de sus parámetros morfométricos se han considerado como tareas que deben realizarse de forma regular dentro del ejercicio de estos instrumentos de gestión. Las tecnologías de información, particularmente los Sistemas de información geográfica (SIG), han demostrado ser herramientas eficientes para el análisis morfométrico de las cuencas, a partir de un modelo de elevación digital, lo cual es de gran utilidad para la generación de áreas susceptibles a eventos de torrencialidad, dentro del marco de la gestión del riesgo [4].

En el artículo desarrollado en Jordania [5], se realiza un análisis para determinar la ocurrencia de avenidas torrenciales, a partir del cálculo de diferentes parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica, utilizando herramientas SIG, como lo son el Área, Perímetro, Ordenes de la corriente, longitudes de la corriente, pendiente media de la cuenca, dirección de flujo, coeficiente de compacidad, frecuencia de drenaje, densidad de drenaje y altura media de la cuenca. Así mismo, Bajabaa [6] en su artículo, propone relacionar el análisis morfométrico de las cuencas, con la geomorfología de la zona, como insumos principales para identificar la ocurrencia de avenidas torrenciales.

En Colombia, también se han realizado análisis de amenazas por avenidas torrenciales, teniendo en cuenta las características morfométricas de la cuenca, sumado a componentes geológicos, geomorfológicos e hidrometeorológicos, como es el caso del Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio de El Colegio, en Cundinamarca, en el cual proponen determinar áreas de amenaza por avenidas torrenciales, a partir del cruce de información física de la cuenca hidrográfica.[7]

De igual forma, en el departamento de Cundinamarca, se desarrolló el “Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, inundación, avenida torrencial e incendios forestales en los municipios de Nemocón, Cogua, Tena, San Antonio del Tequendama y Tocaima en el departamento de Cundinamarca”, donde es importante destacar la determinación de la humedad del suelo, a partir de la interpolación de los datos de precipitación de la cuenca. [8]

Para el caso de zonas urbanas, el Instituto Distrital de Riesgos y Efectos del Cambio Climático IDIGER, presenta un documento técnico con una metodología donde se tienen en cuenta aspectos hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos para la determinación de áreas de amenaza por avenidas torrenciales, de este trabajo, se destaca el análisis morfológico de las cuencas hidrográficas de la zona urbana de Bogotá.[1]

La evaluación de las áreas de amenaza por avenidas torrenciales, puede realizarse de diferentes formas, una de estas, consiste en la evaluación multicriterio, la cual consiste en asignar diferentes pesos a cada parámetro de la cuenca hidrográfica, dependiendo de la relevancia de estos para la generación de eventos de avenidas torrenciales [3].

Otra forma de evaluar las áreas de amenaza por avenidas torrenciales, consiste en la aplicación de lógica difusa, la cual consiste en el análisis de los parámetros que tienen una variación continua en sus valores, como es el caso de la pendiente del terreno, y la espacialización de la lluvia. La teoría de lógica difusa proporciona una base matemática que nos permite definir reglas de decisión para la evaluación de criterios [9].

Las técnicas de toma de decisiones multicriterio, son valiosas para la toma de decisiones que no pueden determinarse de manera directa. El presente artículo tiene en cuenta el papel de los SIG en el proceso de la evaluación de áreas de amenaza por avenidas torrenciales.

A pesar de la necesidad de poder evaluar este fenómeno para tomar decisiones en la gestión del riesgo de la cuenca, muchas veces la delimitación de estas áreas de amenaza por avenidas torrenciales tiene limitaciones por la falta de instrumentación hidrológica en la cuenca, además de la insuficiencia de cartografía base en la zona, en escalas mayores a 1:100.000.

Debido a la carencia de modelos hidráulicos e hidrológicos, para la determinación de áreas propensas a inundaciones que son producto de avenidas torrenciales. Adicionalmente a la determinación y evaluación de áreas de amenaza, a partir de herramientas SIG, en este trabajo se propone la utilización del Índice Topográfico de Humedad (ITH), el cual a partir del modelo de elevación digital DEM, describe el comportamiento de la acumulación de agua, a partir de la pendiente del terreno. El ITH refleja la tendencia que tiene el suelo para saturarse y generar escorrentía [10].

El desarrollo de este proyecto está enfocado en la aplicación de diferentes herramientas de la geomática que faciliten la labor hidrológica e hidráulica para determinar zonas potencialmente susceptibles a fenómenos por avenidas torrenciales, mediante análisis multicriterio.

## 2 Descripción del área de estudio

La zona de estudio tiene un área de 1933 km<sup>2</sup>, se encuentra localizada en la cuenca alta del río Negro, en el departamento de Cundinamarca, limita por el norte con los municipios de Útica, La Peña y el Peñón; por el este con los municipios de Villagómez y Pacho; por el oeste con los municipios de Quebradanegra, Villeta y Vianí; y por el sur con los municipios de San Francisco y Supatá. El punto de cierre de la cuenca es la desembocadura de la quebrada Negra en el río Negro. Ver Figura 1

Las coordenadas geográficas de la zona son:

- Norte: 74°23'35.86" W 5°17'8.737" N
- Este: 74°6'2.23" W 5°14'40.97" N
- Sur: 74°9'47.09" W 5°0'13.66" N
- Oeste: 74°33'46.19" W 4°59'2.98" N

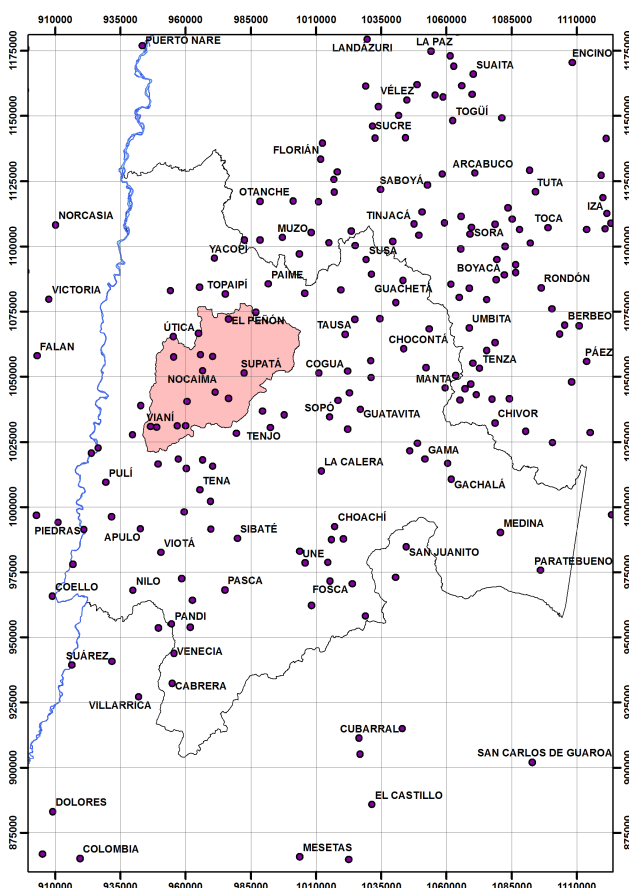


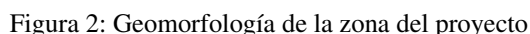
Figura 1: Localización general del proyecto

En cuanto al clima de la cuenca alta del río Negro, la precipitación media anual es aproximadamente de 1520 mm, repartida de forma bimodal, donde los valores máximos se presentan durante los meses de marzo – mayo superando los 1800 mm al año. Los suelos del área de estudio, se caracterizan por ser profundos a moderadamente profundos, bien drenados, con texturas medias a moderadamente gruesas, reacción muy fuerte a medianamente ácida, baja a media saturación de aluminio y fertilidad baja a moderada<sup>1</sup>.

La cuenca alta del río Negro presenta una pendiente media del terreno, superior al 40 %, donde el ambiente morfológico corresponde a unidades estructurales – erosionales (Figura 2). Predominan los terrenos escarpados, y se presentan

<sup>1</sup><https://geoportal.igac.gov.co/es/contenido/datos-abiertos-agrologia>

En la zona predominan áreas cubiertas por pastos naturales y enmalezados, seguidos por mosaico de cultivos permanentes y espacios naturales (Figura 3). [12].



El área de estudio, durante las últimas décadas, se ha visto afectada por fenómenos asociados a crecientes repentinas que desencadenan avenidas torrenciales, los más destructivos se han presentado en el año 1998 y en el 2011, en el municipio de Útica, debido a los flujos torrenciales generados en la quebrada Negra [13].

En esta sección se presentan los insumos y la metodología utilizada para la determinación de áreas de amenaza por avenidas torrenciales en la cuenca alta del río Negro.

El presente artículo cuenta con la siguiente información de utilidad para la determinación de áreas de amenaza por avenidas torrenciales, donde la escala y la temporalidad de la misma, ha dependido de su disponibilidad:

- 5

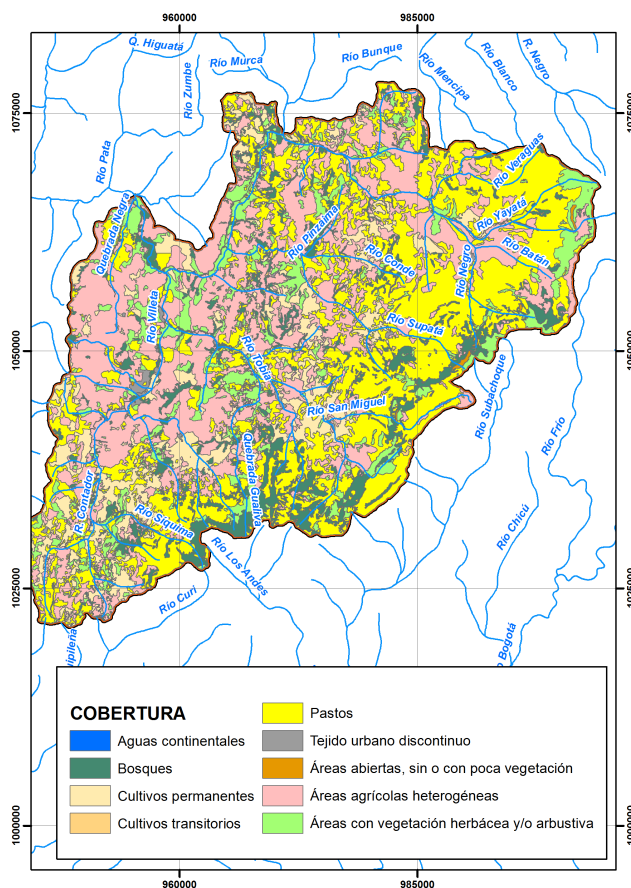


Figura 3: Cobertura de la zona del proyecto

- Datos meteorológicos, proceden de estaciones monitoreadas por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR.
- Mapa Geomorfológico, entregado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, escala 1:100.000.
- Mapa de Suelos de Cundinamarca, escala 1:100.000.
- Mapa de uso y cobertura del suelo, entregado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR, escala 1:25000

Toda la información geográfica tiene el siguiente sistema de proyección de coordenadas: MAGNA\_Colombia\_Bogota. Entre los softwares utilizados para el análisis y procesamiento de información geográfica, se encuentran GRASS 7.6.1, el cual cuenta con módulos, que a partir del Modelo de Elevación Digital DEM, permiten el desarrollo de las siguientes actividades: módulo *r.watershed*<sup>2</sup>, delimita las cuencas hidrográficas; módulo *r.stream*<sup>3</sup>, permite de forma automática y eficaz, obtener la red de drenaje, categorizar las pendientes, estimar la red jerárquica de drenajes y realizar estadísticas de los parámetros morfométricos evaluados.

De igual forma, el software ArcGIS 10.2.2, se empleó para interpolar las lluvias máximas registradas en las estaciones meteorológicas de la zona de estudio, a partir de la herramienta IDW, (disponible en la extensión Spatial Analyst/Interpolation); así mismo, se utilizó para cruzar las capas espaciales, y realizar el análisis multicriterio, con la ayuda de la herramienta Intersect (disponible en la extensión Analyst tools/Overlay) y también para generar diferentes mapas temáticos del área de estudio.

<sup>2</sup><https://grass.osgeo.org/grass76/manuals/r.watershed.html>

<sup>3</sup>[https://grasswiki.osgeo.org/wiki/R.stream.\\*\\_modules](https://grasswiki.osgeo.org/wiki/R.stream.*_modules)

## 3.2 Metodología

A continuación, se presenta una metodología que integra variables morfométricas, geomorfológicas y meteorológicas, a partir de análisis de lógica difusa con herramientas SIG, para determinar las posibles zonas de amenaza por avenidas torrenciales que se generan en una cuenca, las cuales corresponderían a la combinación de estos factores.

### 3.2.1 Morfometría

El primer factor a analizar corresponde a la morfometría, que permite determinar qué tan propensa es la cuenca para que se generen avenidas torrenciales, después de períodos fuertes de precipitación.

Previo a la delineación de cuencas, al Modelo Digital de Elevación, se le debe realizar un tratamiento previo, y una verificación de la red de drenaje generada, con respecto a la cartografía escala 1:25.000, vigente.

Se han delineado siete (7) subcuencas, a partir del DEM ALOS PALSAR, utilizando el software GRASS 7.6.1, con un umbral para la acumulación de flujo de 1 km<sup>2</sup>. Ver Figura 4. A dichas cuencas, se les determinó su grado potencial de amenaza por avenidas torrenciales, teniendo en cuenta sus características morfométricas.

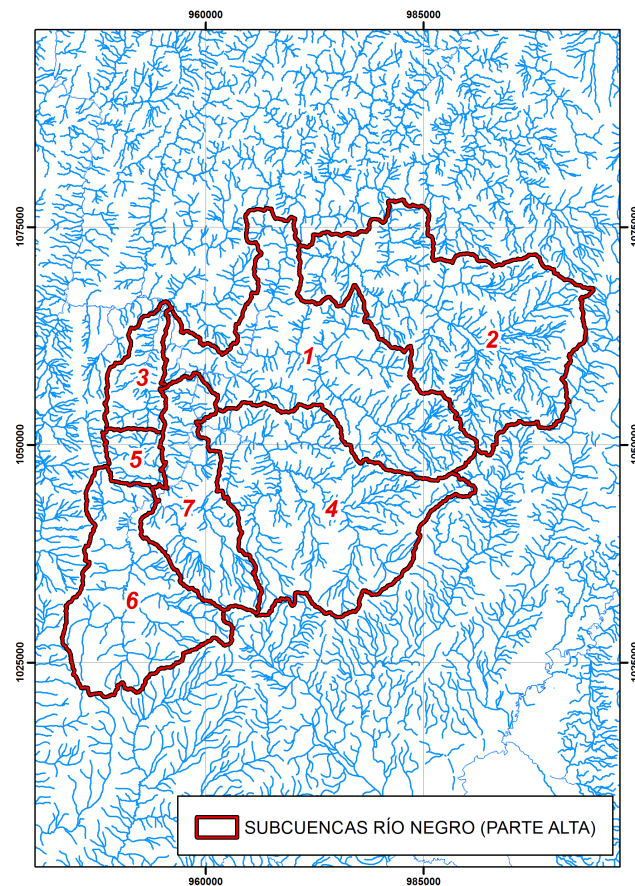


Figura 4: Subcuencas generadas

La determinación de parámetros morfométricos, se subdividió en 3 grupos:

*Parámetros Morfométricos asociados a la forma de la cuenca:* La forma de la cuenca interviene en el comportamiento de la escorrentía, pues influye en la velocidad del escurrimiento superficial. Para cuencas de igual superficie y formas diferentes se espera un comportamiento hidrológico también diferente [14].

*Parámetros Morfométricos asociados al relieve de la cuenca:* La combinación de pendientes del terreno superiores a 25 % con fuertes lluvias, generan desprendimientos de material que pueden desencadenar avenidas torrenciales, por lo tanto, es de gran importancia conocer las características del relieve de la cuenca.

*Parámetros Morfométricos asociados a la red de drenaje de la cuenca:* Conocer los parámetros de la red de drenaje, sirve para poder determinar la torrencialidad de las corrientes de la cuenca para poder discernir que cuencas serán más susceptibles a fenómenos de avenidas torrenciales, los parámetros que se evalúan en esta parte del artículo, son los relacionados con la jerarquización de la red de drenajes.

El análisis morfométrico para las siete (7) subcuencas, se ha llevado a cabo con las herramientas SIG descritas, y las ecuaciones matemáticas (cita de las ecuaciones) que se ilustran en el Cuadro 1.

| PARÁMETRO                           | FÓRMULA   |
|-------------------------------------|---|
| ÁREA DE LA CUENCA                   | $A(Km^2)$   |
| PERÍMETRO DE LA CUENCA              | $P(Km)$   |
| ORDEN DE LAS CORRIENTES             | $U$ Rango jerárquico                                  |
| NÚMERO DE CORRIENTES                | $N_u = N_1 + N_2 + \dots + N_u$                       |
| LONGITUD CORRIENTES                 | $L_u = L_1 + L_2 + \dots + L_2 (Km)$                  |
| LONGITUD CAUCE PRINCIPAL            | $Lc(Km)$  |
| RAZÓN DE BIFURCACIÓN                | $R_b = N_u/N_u + 1$                                   |
| FRECUENCIA DE CORRIENTES            | $F_s = N_u/A$   |
| LONGITUD DE LA CUENCA               | $Lb(Km)$  |
| RAZÓN DE ELONGACIÓN                 | $1,128 * \sqrt{A/Lb}$                                 |
| FACTOR DE FORMA                     | $F_f = A/Lb^2$  |
| RELACIÓN DE CIRCULARIDAD            | $R_c = 4\pi * (A/P_2)$                                |
| COEFICIENTE DE COMPACIDAD           | $C_c = 0,2812 * (P/A0,5)$                             |
| DENSIDAD DE DRENAJE                 | $D_d = L_u/A(Km/Km^2)$                                |
| RELIEVE DE LA SUBCUENCA             | $B_h = H_{MAX} - H_{min}$ donde $H$ es la Altura (Km) |
| ALTURA MEDIA DE LA CUENCA           | $Hm(Km)$  |
| PENDIENTE DE LA CUENCA $S_w$        | % A PARTIR DEL DEM                                    |
| TIEMPO DE CONCENTRACIÓN             | $T_c = (0,02 * L_c 0,77 * S_c - 0,385)$ (horas)       |
| PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL $S_c$ | PERFIL CAUCE  |
| COEFICIENTE DE TORRENCIALIDAD       | $C_t = N_1/A$   |

Cuadro 1: Parámetros morfométricos[14]

Se establecen dos grupos para el análisis de la morfometría de las cuencas, el primer grupo contiene ocho parámetros, los cuales tienen una proporción directa con el grado de amenaza por eventos torrenciales en la cuenca, lo cual quiere decir, que cuanto mayor sea el valor del parámetro, mayor será el grado de amenaza. Este grupo comprende los siguientes parámetros: relación de circularidad ( $R_c$ ), relieve de la subcuenca ( $B_h$ ), densidad de drenaje ( $D_d$ ), frecuencia de corrientes ( $F_s$ ), orden de las corrientes ( $U$ ), número total de arroyos ( $N_u$ ), longitud total de arroyos ( $L_u$ ) y pendiente de la subcuenca en grados ( $S_w$ ). El segundo grupo, comprende tres parámetros que son inversamente proporcionales al grado de amenaza, esto es que cuanto mayor sea el valor del parámetro, menor será el grado de riesgo. Este grupo consta de los siguientes parámetros: relación de alargamiento ( $R_e$ ), factor de forma ( $F_f$ ), coeficiente de compacidad ( $C_c$ ). En las Figuras 5 y 6 se observa la distribución de las pendientes y la elevación en la cuenca alta del río Negro.

Adicionalmente a los parámetros anteriores, también se calculan la relación de bifurcación ( $R_b$ ), el cual es la relación entre el número de cauces de un orden dado y el número de cauces del orden inmediatamente superior (Lux, 2016); la pendiente del cauce principal de cada cuenca, que nos da una idea de la velocidad de escurrimiento, pues de acuerdo [15], a mayor pendiente del cauce, mayor velocidad, se obtiene a partir del perfil topográfico del drenaje; y el tiempo de concentración, el cual está determinado como el lapso que tarda en llegar la precipitación al punto de salida de la cuenca, en forma de escorrentía [1].

En la Figura 7 se observa la red de drenaje, categorizada de acuerdo a los órdenes establecidos con la ayuda del software SIG GRASS 7.6.1, donde se puede apreciar que el cauce principal de la cuenca (río Negro) es de orden ocho (8), y sus afluentes principales tienen una red de drenajes de ordenes uno y dos bastante densa.

### 3.2.2 Precipitación

Una de las principales causas generadoras de avenidas torrenciales, es la precipitación de alta intensidad. Desafortunadamente, en algunas cuencas no se cuenta con estaciones meteorológicas con registros de lluvia, durante eventos de avenidas torrenciales. Por lo tanto, se deben realizar interpolaciones con información de precipitaciones diarias, a partir del valor máximo registrado.



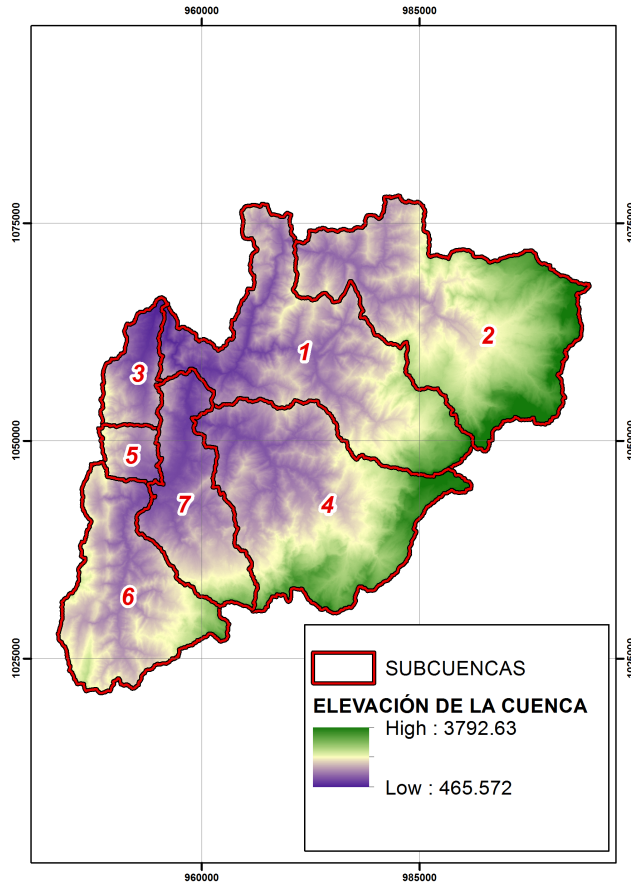


Figura 5: Elevación del terreno

Se escogieron en total veintiuno (21) estaciones meteorológicas (ver Cuadro 2) , teniendo en cuenta la disponibilidad de los datos y la cercanía con la cuenca alta del río Negro, operadas por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR. En la Figura 8, se observa la distribución de las estaciones con respecto al área de estudio.

Las precipitaciones máximas presentadas para un período de retorno de 2.33 años, oscilan entre 900 mm y 1900 mm, donde los valores máximos ocurren en la subcuenca 4, donde el cauce principal es el río Tobia.

### 3.2.3 Cobertura del suelo y geomorfología

La cobertura del suelo, se analizó teniendo en cuenta que, a menor cobertura, mayor amenaza por avenidas torrenciales. La CAR Cundinamarca, cuenta con un mapa de uso actual del suelo, escala 1:25.000, el cual clasificó las unidades de cobertura, mediante la metodología Corine Land Cover.

De acuerdo al Cuadro 3, la cobertura que tiene una mayor área corresponde a Pastos con mas de 600 km<sup>2</sup>, mientras que, la cobertura de suelos desnudos o con poca vegetación, corresponde al 1 % del total del área de la zona de estudio.

Una condición para que se generen eventos de avenidas torrenciales, está ligada a la estructura geomorfológica de la cuenca, y al material detrítico que pueda transportar mediante sus cauces [7]. El IDEAM y el IGAC, desarrollaron mapas a escala regional con información del paisaje geomorfológico y los procesos morfodinámicos que se presentan en la zona de estudio. A nivel geomorfológico, se puede afirmar que la zona de estudio presenta paisajes modelados por fuertes escarpes, donde el material está compuesto por depósitos coluvioaluviales de formas variadas. De acuerdo al Cuadro 4, mas del 60 % del total del área de estudio, tiene paisajes geomorfológicos de pendientes fuertemente inclinadas, donde se presentan procesos morfodinámicos, asociados a derrumbes y deslizamientos.

| CÓDIGO  | CAT | NOMBRE                                    | CORRIENTE          | MUNICIPIO  | ALTURA<br>(msnm) | ESTE (X) | NORTE<br>(Y) |
|---------|-----|---|--------------------|------------|------------------|----------|--------------|
| 2120026 | PG  | VENTA LAR-<br>GA                          | R. FRÍO            | ZIPAQUIRÁ  | 3038             | 1002997  | 1052361      |
| 2120044 | PG  | PRADERA LA                                | R. SUBACHO-<br>QUE | SUBACHOQUE | 2785             | 993879   | 1045361      |
| 2120055 | PM  | UNIÓN LA                                  | R. SUBACHO-<br>QUE | EL ROSAL   | 2648             | 981100   | 1030475      |
| 2120069 | PM  | TESORO                                    | R. BOJACÁ          | FACATATIVÁ | 2594             | 973727   | 1022229      |
| 2120088 | PG  | SALITRE EL                                | R. NEUSA.          | TAUSA      | 3155             | 1008546  | 1064193      |
| 2120174 | PM  | MANJUI                                    | R. BOJACÁ          | FACATATIVÁ | 3220             | 965885   | 1022500      |
| 2120179 | PG  | ARGENTINA                                 | R. CURI            | QUIPILE    | 1150             | 950671   | 1017569      |
| 2120185 | PG  | TRIBUNA LA                                | R. LOS ANDES       | FACATATIVÁ | 2778             | 963423   | 1029551      |
| 2120214 | PM  | PÁRAMO DE<br>GUERRERO                     | R. FRÍO            | ZIPAQUIRÁ  | 3250             | 1003992  | 1057070      |
| 2120629 | CP  | VENECIA                                   | R. ANDES           | FACATATIVÁ | 2690             | 964661   | 1027120      |
| 2120652 | CO  | PALOQUEMAO                                | R. APULO           | ZIPACÓN    | 2181             | 963875   | 1014462      |
| 2120691 | CP  | PLANADAS                                  | R. SUBACHO-<br>QUE | SUBACHOQUE | 3365             | 996821   | 1050936      |
| 2123502 | CP  | PLACER EL                                 | Q. SECA            | PULÍ       | 1345             | 929381   | 1008325      |
| 2306033 | PM  | AGUA FRÍA                                 | Q. CHARCÓN         | QUEBRADAN. | 1319             | 956614   | 1055444      |
| 2306034 | PM  | SAN ISIDRO                                | R. CUNE            | VILLET     | 1136             | 952819   | 1049843      |
| 2306039 | PM  | TIESTOS LOS                               | Q. LOS TIESTOS     | LA PALMA   | 1664             | 963719   | 1083716      |
| 2306308 | PM  | NEGRETE                                   | R. RUTE            | PACHO      | 2318             | 991884   | 1055059      |
| 2306507 | CP  | INST. AGRÍCO-<br>LA. ESC. VO-<br>CACIONAL | R. PATASÁ          | PACHO      | 1932             | 994683   | 1061887      |
| 2306516 | CP  | ACOMODO EL                                | R. TABACAL         | LA VEGA    | 1384             | 974629   | 1046306      |
| 2306517 | CP  | GUADUAS                                   | R. GUADUERO        | GUADUAS    | 1052             | 942660   | 1050618      |
| 2312019 | PM  | PINOS LOS                                 | R. NEGRO           | TAUSA      | 3477             | 1005284  | 1070146      |

Cuadro 2: Estaciones Climatológicas

| COBERTURA                                   | AREA ( $Km^2$ ) |
|---|-----------------|
| Áreas abiertas, sin o con poca vegetación   | 2.93            |
| Tejido urbano discontinuo                   | 10.05           |
| Cultivos transitorios                       | 2.48            |
| Cultivos permanentes                        | 210.46          |
| Pastos                                      | 684.98          |
| Áreas agrícolas heterogéneas                | 625.02          |
| Bosques                                     | 173.42          |
| Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva | 218.64          |
| Aguas continentales                         | 5.12            |

Cuadro 3: Áreas por cobertura del suelo

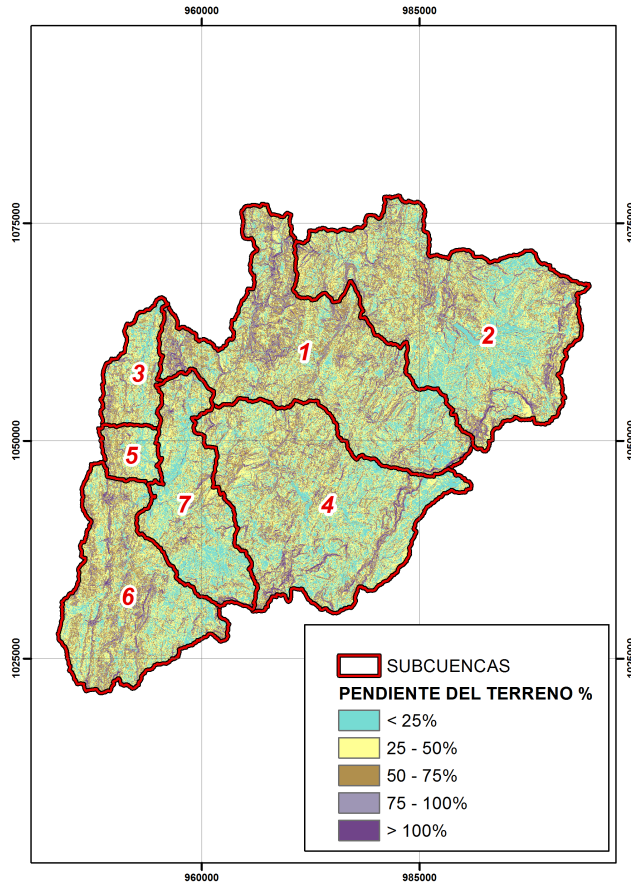


Figura 6: Pendientes del terreno

### 3.2.4 Evaluación de áreas de amenaza por avenidas torrenciales

Una vez calculados los parámetros morfométricos, se asignan grados de calificación (Cuadro 5) que oscilan entre valores de 1 (muy baja amenaza) a 5 (alta amenaza), de acuerdo a las características de torrencialidad que presenta la cuenca.

A partir de los parámetros morfométricos calculados, se han determinado un índice adicional de torrencialidad de la cuenca hidrográfica (Cuadro 6), el cual esta relacionado con el tiempo de concentración

Para determinar el grado de amenaza por avenidas torrenciales, de acuerdo al paisaje geomorfológico (Cuadro 7) presente en el área de estudio, se asignan calificaciones o pesos que oscilan entre valores de 1 (muy baja amenaza) a 5 (alta amenaza).

El análisis de la precipitación y de las coberturas de la tierra se incluyen en la determinación del Índice de amenaza de flujos torrenciales de fase sólida en laderas (IAFSL), el cual permite establecer la tendencia de las cuencas a deslizamientos, para estimar la importancia de la carga sólida en el flujo [8].

Los factores que se analizan en el IAFLS son:

- Humedad del terreno

Se refiere a la dsitribución de las lluvias máximas en el área de estudio. Cuadro 8

- Pendiente de las cuencas

La pendiente del terreno permite establecer que zonas tienen pendientes fuertes, que influyen en fenómenos de avenidas torrenciales. Cuadro 9

- Grado de exposición

| SISTEMA GEO-MORFOLÓGICO  | Glaciar heredado  | Vertientes medias  | Montaña alto andina inestable  | Vertientes medias  |
|--------------------------|---|--|--|--|
| UNIDAD                   | MAh2  | MMv2d  | MAi  | MMv2v  |
| ESTRUCTURA               | Relieves abruptos de plegamiento en rocas sedimentarias o metamórficas  | Rocas sedimentarias plegadas y falladas.   | Relieves abruptos en rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias.   | Rocas sedimentarias plegadas y falladas.   |
| MODELADO GEO-MORFOLÓGICO | Pendientes muy inclinadas en los frentes e inclinadas en los reverses. Drenajes de órdenes inferiores. Relieve suavizado respecto al glaciar y periglacial. | Pendiente fuertemente inclinada. Escarpes de sinclinales y anticlinales. Geoformas escalonadas correspondientes con las crestas de estratos. | Pendientes quebradas. Concentración de la red de drenaje.  | Pendientes fuertemente inclinadas a quebradas en los frentes y ligeramente planas a inclinadas en los reverses. Control parcial de la red de drenaje por fallas y fracturas. |
| MATERIAL                 | Depositos de detritos heterométricos de origen glaciar. Morrenas de fondo laterales y frontales.  | Depósitos heterométricos de origen coluvioaluvial con dominancia de gravillas y bloques, generalmente con espesor inferior a 3 m             | Depósitos heterométricos de vertiente. Afloramientos rocosos y suelos poco desarrollados.  | Depósitos coluvioaluviales de pocos cm de espesor, con granulometría blocosa dominante. Depósitos de pendiente.  |
| PROCESOS MORFODINÁMICOS  | Sufosión, disección moderada.   | Derrumbes y deslizamientos. Escurrimiento superficial difuso y concentrado   | Movimientos en masa generalizados principalmente tipo derrumbe. Disección profunda con arranque y transporte de sedimentos. Escurrimiento superficial difuso | Derrumbes y deslizamientos. Flujos torrenciales  |
| AREA (Km2)               | 16.407606   | 277.657153   | 401.322474   | 1237.696419  |

Cuadro 4: Sistemas Geomorfológicos

| PARÁMETRO MORFOMÉTRICO            | CATEGORIAS   |             |              |             |              |
|-----------------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                                   | 1 (MUY BAJA) | 2 (BAJA)    | 3 (MODERADA) | 4 (ALTA)    | 5 (MUY ALTA) |
| Densidad de Drenaje Dd            | <1.0         | 1.01 - 1.20 | 1.21 - 1.50  | 1.51 - 1.80 | >1.81        |
| Razón de Bifurcación Rb           | <3.0         | 3.01 - 3.20 | 3.21 - 3.80  | 3.81 - 4.00 | >4.01        |
| Frecuencia de las corrientes Fs   | <1.0         | 1.01 - 1.20 | 1.21 - 1.80  | 1.81 - 2.00 | >2.01        |
| Razón de Elongación Re            | <0.6         | 0.61 - 0.81 | 0.81 - 1.00  |             |              |
| Factor de forma Ff                | <0.22        | 0.22 - 0.40 | 0.41 - 0.60  | 0.60 - 1.20 | >1.20        |
| Coefficiente de Compacidad Cc     | >1.6         | 1.35 - 1.59 | 1.25 - 1.34  | 1.15 - 1.24 | 1.00 - 1.14  |
| Coefficiente de torrencialidad Ct | <1.0         | 1.01 - 1.20 | 1.21 - 1.50  | 1.51 - 1.80 | >1.81        |

Cuadro 5: Calificación de amenaza por parámetros morfométricos

| Tiempo de concentración (horas) | IACTC           | CLASE |
|---------------------------------|-----------------|-------|
| >2 horas                        | >2 Horas        | 1     |
| 1.5 - 1.0 horas                 | 1.5 - 2.0 hora  | 2     |
| 1.0 - 1.5 horas                 | 1.0 - 1.5 horas | 3     |
| 0.5 - 1.0 horas                 | 0.5 - 1.0 horas | 4     |
| <0.5 horas                      | <0.5 horas      | 5     |

Cuadro 6: Indicador de amenaza de crecidas torrenciales con base en tiempo de concentración (IACTC)[1]

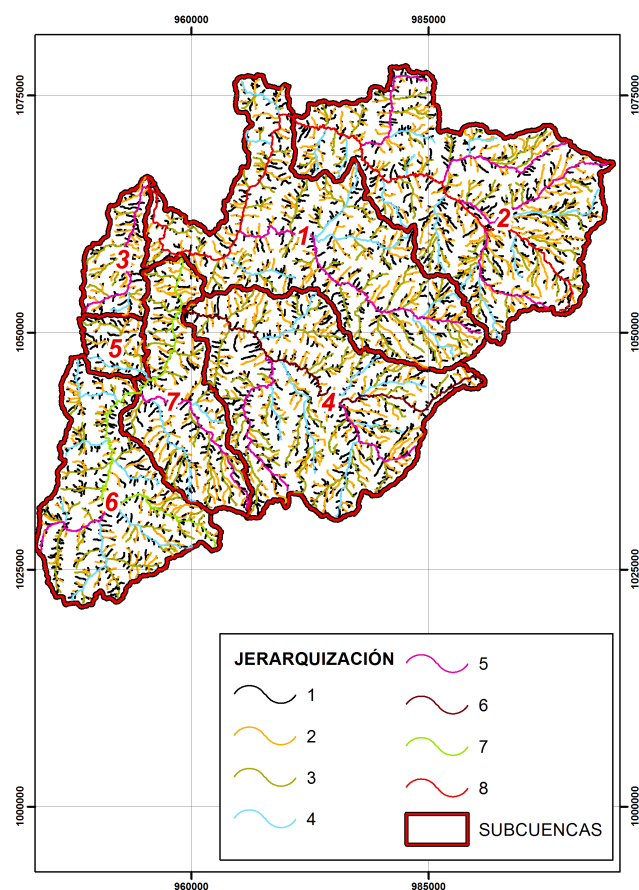


Figura 7: Ordenes de drenaje (Horton)

| SISTEMA GEOMORFOLÓGICO        | UNIDAD | PROCESOS MORFODINÁMICOS   | CLASE |
|-------------------------------|--------|---|-------|
| Glaciar heredado              | MAh2   | Sufosión, disección moderada.   | 3     |
| Vertientes medias             | MMv2d  | Derrumbes y deslizamientos. Esguerrimiento superficial difuso y concentrado   | 2     |
| Montaña alto andina inestable | MAi    | Movimientos en masa generalizados principalmente tipo derrumbe. Disección profunda con arranque y transporte de sedimentos. Esguerrimiento superficial difuso | 4     |
| Vertientes medias             | MMv2v  | Derrumbes y deslizamientos. Flujos torrenciales   | 5     |

Cuadro 7: Calificación geomorfológica

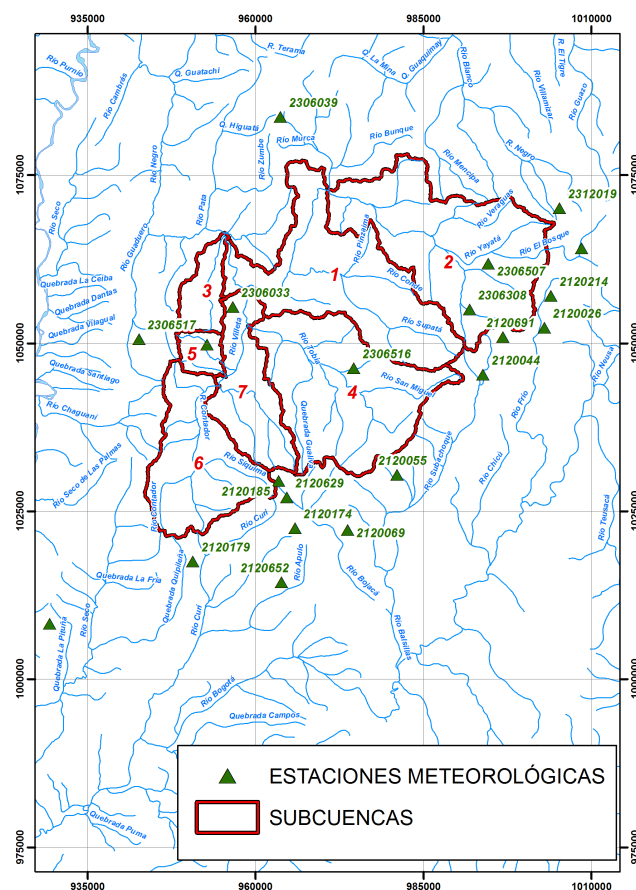


Figura 8: Estaciones usadas para análisis de lluvia

| Precipitación total anual (mm) Período de retorno 2.3 años | CLASE |
|--|-------|
| 900 - 1100 mm  | 1     |
| 1101 - 1300 mm   | 2     |
| 1301 - 1500 mm   | 3     |
| 1501 - 1700 mm   | 4     |
| 1701 - 1900 mm   | 5     |

Cuadro 8: Calificación humedad del suelo

| Pendiente del terreno % | CLASE |
|-------------------------|-------|
| <25 %                   | 1     |
| 25 - 50 %               | 2     |
| 50 - 75 %               | 3     |
| 75 - 100 %              | 4     |
| >100 %                  | 5     |

Cuadro 9: Calificación pendiente del terreno



| Índice de amenaza de flujos torrenciales en fase sólida, en laderas IAFSL | CLASE    |
|---|----------|
| 0 a 1   | Muy Baja |
| 1 a 2   | Baja     |
| 2 a 3   | Moderada |
| 3 a 4   | Alta     |
| 4 a 5   | Muy Alta |

Cuadro 11: Calificación IAFSL[16]

Como resultado del cruce de capas espaciales, se sumaron todos los grados de amenaza (1 a 5) obtenidos en cada parámetro analizado, y al totalizar estos valores se obtiene un rango de 10 a 50 para la amenaza total por avenida torrencial. Teniendo en cuenta lo anterior, se realiza la siguiente clasificación para generar el mapa resultado. Cuadro 12

| GRADO AMENAZA | Amenaza por avenidas torrenciales |
|---------------|-----------------------------------|
| 0 - 10        | Muy Baja                          |
| 11 - 20       | Baja                              |
| 21 - 30       | Moderada                          |
| 31 - 40       | Alta                              |
| 41 - 50       | Muy Alta                          |

Cuadro 12: Grado de amenaza por avenidas torrenciales

### 3.2.5 Índice topográfico de Humedad - ITH

Teniendo en cuenta la carencia de modelos hidráulicos en la zona de estudio, el Índice Topográfico de Humedad ITH, es de gran utilidad para poder estimar de forma aproximada las áreas inundables producto de avenidas torrenciales, pues refleja la tendencia del suelo a generar escorrentías, a partir de la acumulación de flujo, que se establece mediante el modelo de elevación digital del terreno DEM [10]. Es importante mencionar que el ITH no debe considerarse como una simulación hidrológico o hidráulica para el mapeo de inundaciones, sin embargo, si representa una herramienta rápida y útil para la delineación preliminar de áreas de inundación en cuencas que carecen de modelos hidráulicos y batimetrías [17].

El modulo `r.topidx` del software GRASS 7.6.1 calcula el índice topográfico del suelo, y genera zonas de inundación, a partir del DEM 12.5 m de resolución espacial<sup>4</sup>.

## 4 Resultados

De acuerdo a la metodología establecida para evaluar las amenazas por avenidas torrenciales, a continuación se presentan los resultados obtenidos, para conocer las características morfométricas de la cuenca, como se muestra en el Cuadro 13.

Como se observa en el Cuadro 13, las subcuencas 1, 2 y 4, tienen las áreas más grandes, superando los 400 Km<sup>2</sup>. En cuanto a la forma de las cuencas, se puede observar que todas las subcuencas, son de forma obloga a rectangular [2].

En cuanto a la red de drenaje presente en el área de estudio, se observa que es una red densa, donde la densidad de drenaje es mayor a 1.5, indicando la potencialidad que tiene cada subcuenca para generar escorrentía, después de períodos largos de lluvias intensas. El drenaje más largo, que es el Río Negro, el cual nace en la subcuenca 2, tiene una longitud de 51.89 Km.

Para el caso de la pendiente media del terreno, esta varía entre 30 % y 50 %, lo cual indica que en la zona se presentan fuertes escarpes y terrenos muy inclinados.

Con la calificación establecida para determinar el grado de amenaza al que pertenece cada parámetro analizado, se obtuvo la siguiente distribución espacial de cada uno de estos.

En la figura 10 se encuentran los resultados obtenidos para los parámetros morfométricos asociados a la forma de la cuenca: Factor de Forma y Razón de elongación. De acuerdo a la zona de estudio, estos parámetros no son representativos

<sup>4</sup><https://grass.osgeo.org/grass77/manuals/r.topidx.html>



| SUBCUENCA            | 1      | 2       | 3      | 4      | 5     | 6      | 7      |
|----------------------|--------|---------|--------|--------|-------|--------|--------|
| A (Km <sup>2</sup> ) | 431.42 | 486.68  | 72.74  | 430.87 | 40.12 | 270.69 | 193.54 |
| P (Km)               | 201.83 | 176.43  | 62.73  | 155.40 | 40.28 | 123.09 | 119.63 |
| $L_b$ (Km)           | 43.00  | 33.60   | 15.30  | 34.70  | 7.60  | 24.60  | 27.40  |
| Nu (TOTAL)           | 912.00 | 1030.00 | 162.00 | 964.00 | 85.00 | 632.00 | 400.00 |
| $\Sigma Lu$          | 775.57 | 969.25  | 137.67 | 834.99 | 74.71 | 502.04 | 382.66 |
| $D_d$                | 1.80   | 1.99    | 1.89   | 1.94   | 1.86  | 1.85   | 1.98   |
| $F_s$                | 2.11   | 2.11    | 2.23   | 2.24   | 2.12  | 2.33   | 2.10   |
| $L_c$                | 39.16  | 51.89   | 1.29   | 49.39  | 8.69  | 37.68  | 20.40  |
| $R_b$                | 4.12   | 3.89    | 3.71   | 4.02   | 4.42  | 3.77   | 4.41   |
| $R_e$                | 0.54   | 0.74    | 0.63   | 0.67   | 0.94  | 0.75   | 0.57   |
| $F_f$                | 0.23   | 0.43    | 0.31   | 0.36   | 0.69  | 0.45   | 0.26   |
| $R_c$                | 0.13   | 0.20    | 0.23   | 0.22   | 0.31  | 0.22   | 0.17   |
| $C_c$                | 2.73   | 2.25    | 2.07   | 2.11   | 1.79  | 2.10   | 2.42   |
| $B_h$                | 3.10   | 2.85    | 1.65   | 2.84   | 1.27  | 2.26   | 2.49   |
| $H_m$                | 1.50   | 2.07    | 1.11   | 1.83   | 1.33  | 1.58   | 1.30   |
| $S_w$                | 50.18  | 45.26   | 43.43  | 44.07  | 42.84 | 47.79  | 39.12  |
| Sc                   | 0.04   | 0.07    | 0.05   | 0.07   | 0.12  | 0.07   | 0.03   |
| Tc                   | 1.22   | 1.16    | 0.08   | 1.13   | 0.24  | 0.91   | 0.78   |
| Ct                   | 1.64   | 1.62    | 1.69   | 1.75   | 1.77  | 1.82   | 1.61   |

Cuadro 13: Morfometría calculada

en la determinación de áreas de amenaza, pues las cuencas del área de estudio son de forma alargada, lo cual indica que los tiempos de viaje del flujo es más largo. Razón por la cual se observa que el grado de amenaza oscila entre Muy Baja y Moderada.

También se observan los resultados para los parámetros asociados a la red de drenaje: Frecuencia de drenaje y Razón de Bifurcación, donde el grado de amenaza varía de Moderada a Muy Alta. De acuerdo a estos resultados, se puede afirmar que la red de drenaje presente en el área de estudio, es muy densa, lo cual la hace susceptible a fuertes crecidas repentinas, después de lluvias acumuladas.

El último parámetro que se encuentra representado en la figura 10, corresponde a la geomorfología, donde el grado de amenaza oscila entre Baja y Muy Alta. Las áreas con amenaza Baja se encuentran en zonas con geoformas escalonadas, las cuales se presentan en el extremo occidental de la cuenca alta del río Negro. Las áreas de amenaza Alta corresponden a los sitios aledaños a la desembocadura de los drenajes, y finalmente el grado de amenaza Muy Alto se encuentra en las geoformas de escarpes con pendientes superiores al 50 %.

En la figura 11, se observan los resultados obtenidos en los parámetros analizados que tienen mayor influencia en la determinación de la amenaza por avenidas torrenciales. Los parámetros asociados a la red de drenaje: Densidad de drenaje, Coeficiente de Torrencialidad y Tiempo de Concentración, influyen en la generación de áreas de amenaza de grado Alto y Muy Alto. Para el caso de la densidad de drenaje, todas las subcuencas presentaron categoría de amenaza Muy Alta, menos la cuenca número 1, la cual tiene amenaza Alta. Lo anterior se debe a la red de drenaje, de tipo dendrítico, que tiene la zona de estudio, es muy densa e indica que la cuenca posee suficiente drenaje para responder rápidamente al aumento de fuertes lluvias.

El coeficiente de torrencialidad, que en promedio para la zona de estudio, es Alto, representa el número de drenajes de orden 1, que hay en el total del área de cada subcuenca. La cantidad de corrientes de este orden indica la alta acumulación de escorrentía y la disminución de los tiempos de concentración en presencia de tormentas.

Los tiempos de concentración de cada subcuenca, varían entre Moderado y Muy Alto. Las subcuencas 3 y 5, a pesar de su forma alargada, tienen tiempos menores a 30 minutos, lo cual estaría relacionado con las pendientes del terreno que se presentan en esas zonas.

De acuerdo al parámetro de pendiente del terreno, se observa que la mayoría del área de la zona de estudio presenta pendientes entre 25 - 50 %, correspondiente a escarpes fuertes, los cuales son propensos a deslizamientos.

Como se menciona en la metodología, el cálculo del Índice de amenaza de flujos torrenciales en fase sólida, en laderas; incluye un análisis integrado de pendientes, cobertura y lluvia. En el resultado de la figura 11, se observa que este en promedio es Moderado, lo cual puede deberse a que en un gran porcentaje el suelo está cubierto de mosaicos de pastos.

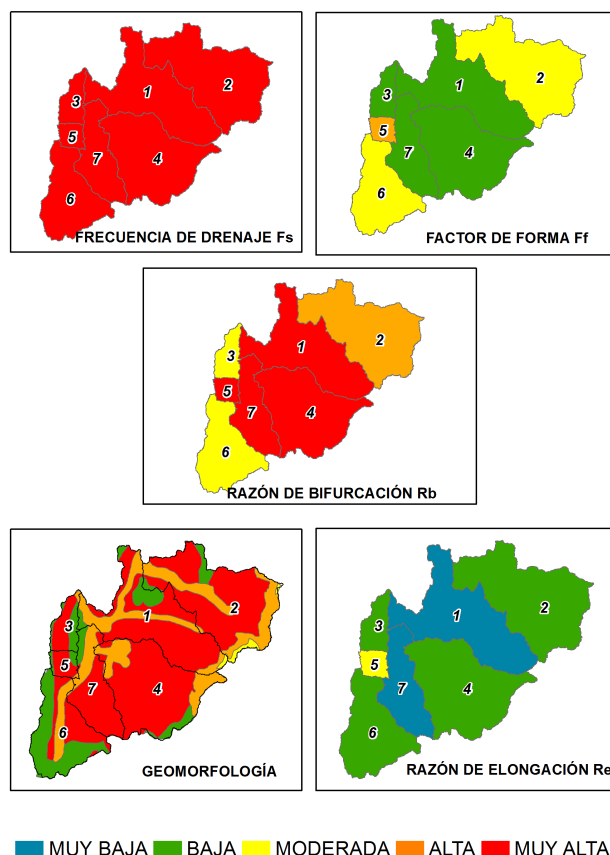


Figura 10: Clasificación de la Amenaza por parámetro

#### 4.1 Amenaza por Avenidas Torrenciales

El resultado del análisis integrado de todos los parámetros evaluados se presenta en el Cuadro 14. Donde se observa que el 51 % del total del área de estudio, presenta Amenaza Alta por Avenidas Torrenciales, esto puede deberse a que, en general, los parámetros morfométricos analizados en su mayoría tenían valores altos, como es el caso de la densidad de drenaje, la frecuencia de drenaje y la razón de bifurcación.

También es importante resaltar que el grado de amenaza Muy Alta es del 46 % del total del área de la cuenca alta del río Negro, lo cual indica que debido a las características físicas de la cuenca, la combinación de fuertes pendientes (inclinaciones superiores al 50 %) y de cobertura vegetal destinada a actividades agrícolas, si son determinantes para poder determinar áreas potencialmente afectadas por este fenómeno natural.

| GRADO AMENAZA | Amenaza por avenidas torrenciales | ÁREA (Km <sup>2</sup> ) | % ÁREA |
|---------------|-----------------------------------|-------------------------|--------|
| 0 - 10        | Muy Baja                          | 0                       | 0      |
| 11 - 20       | Baja                              | 0                       | 0      |
| 21 - 30       | Moderada                          | 59                      | 3 %    |
| 31 - 40       | Alta                              | 983                     | 51 %   |
| 41 - 50       | Muy Alta                          | 891                     | 46 %   |

Cuadro 14: Resultados amenaza por avenidas torrenciales

En la Figura 12, se observa la distribución espacial de la amenaza por Avenidas Torrenciales, donde, la categoría de amenaza Muy Alta, se presenta en su gran mayoría en las subcuencas 2,3,4,5,6 y 7. Es importante resaltar que los valores máximos de lluvia se presentan en la parte media de la subcuenca 4, donde el cauce principal es el río Tobia, lo cual puede influenciar los resultados en las subcuencas aguas abajo.

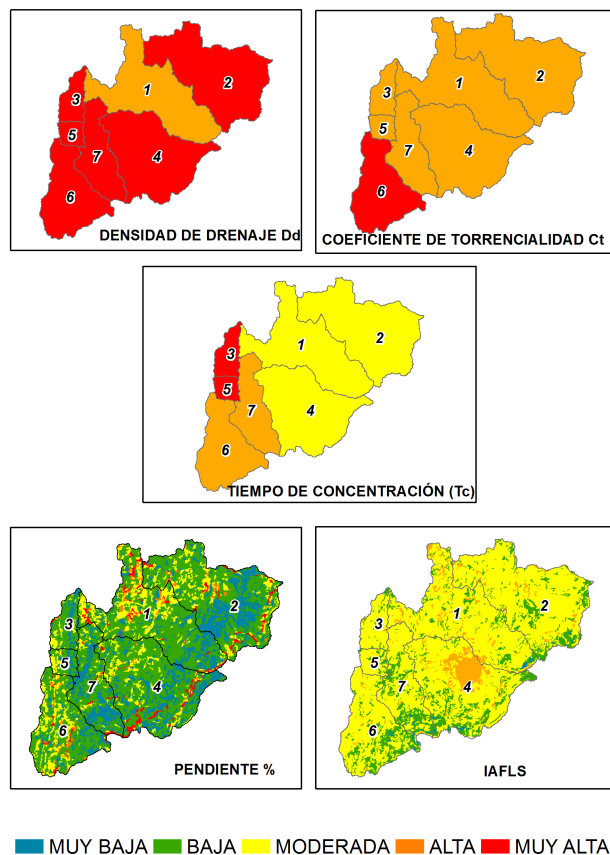


Figura 11: Clasificación de la Amenaza por parámetro

Cabe mencionar que en la subcuenca 3, cauce principal quebrada Negra, se han presentado eventos de avenidas torrenciales en los años 1988 y 2011, dejando grandes pérdidas económicas, lo anterior, porque en la figura 12, se observa que esta subcuenca presenta en más del 60 % del total de su área, grado de amenaza Muy Alta, lo cual nos indica la buena respuesta de la metodología aplicada para el desarrollo de este artículo.

Las áreas de amenaza Alta, se encuentran distribuidas en las zonas de pendiente media, donde los drenajes se encuentran próximos a desembocar.

#### 4.2 Índice Topográfico de Humedad ITH

Como se menciona en la metodología, a manera de propuesta adicional, en el presente estudio se hace un análisis del índice topográfico como insumo para el cálculo de áreas inundables por eventos de crecidas repentinas. Teniendo en cuenta la carencia de modelos hidráulicos en la zona de estudio.

A partir de las herramientas SIG disponibles, y el modelo de elevación digital DEM de 12.5m de resolución, se calcula el ITH, teniendo en cuenta la pendiente del terreno y los valores de acumulación de flujo.

En la Figura 13, se aprecian las áreas potencialmente inundables, las cuales han sido generadas a partir del cálculo del índice topográfico de humedad. Se puede ver, que estas áreas de inundación, se distribuyen espacialmente en las laderas de montaña, donde se presentan los drenajes de orden 1 y 2, los cuales son más propensos a generar eventos de crecientes repentinas. Así mismo, se puede observar, en la parte norte de la subcuenca 3, Quebrada Negra, áreas de inundación cerca al punto donde desemboca al río Negro, recordemos que históricamente en esa zona, se han registrado fenómenos de avenidas torrenciales, esto quiere decir, que las propiedades del terreno, permiten que se acumule escorrentía en esta parte de la subcuenca.



## 5 Conclusiones y trabajo futuro

Mediante el cruce espacial de los parámetros morfométricos, pendiente del terreno, paisajes geomorfológicos y lluvias máximas, se pudieron combinar estas variables, para poder realizar una evaluación integrada y determinar tipo de amenaza por avenidas torrenciales se presenta en la zona.

Se generaron áreas potencialmente inundables, a partir del Índice Topográfico de Humedad ITH, teniendo en cuenta la pendiente del terreno y la acumulación de flujo. Lo anterior es de gran utilidad para poder establecer las zonas propensas a la generación de crecientes torrenciales, teniendo en cuenta la tendencia que tiene el suelo para generar escorrentía. A pesar de no contar con modelos hidrológicos e hidráulicos fue posible establecer una aproximación de zonas de inundación, contando con herramientas SIG.

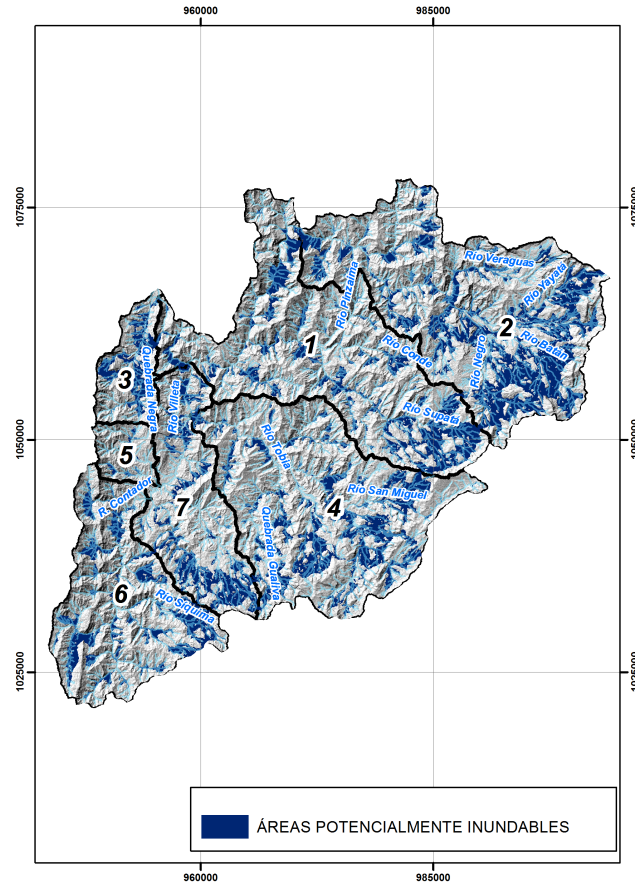


Figura 13: Áreas potencialmente inundables, a partir del calculo del ITH

La metodología planteada en este documento, puede mejorarse implementando trabajos de campo, que incluyan batimetrías y levantamientos topográficos, para tener información primaria de las pendientes del terreno. Otro aspecto que puede mejorar la metodología implementada, consiste en implementar modelos hidrológicos e hidráulicos en el área de estudio, para poder determinar las zonas de inundación, que fueron preliminarmente delineadas con el ITH.

## Referencias

- [1] IDIGER. Documento técnico de soporte estudios básicos “Amenaza por avenidas torrenciales en perspectiva de cambio climático”. 6:5–9, 2017.
- [2] IDEAM. *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua*. 2013.
- [3] J. González L. Montoya, S. Arroyave. Evaluación De Zonas De Amenaza Por Avenidas Torrenciales Utilizando Metodologías Cualitativas. Caso De Aplicación a La Quebrada Doña María. *Revista de Ingenierías Universidad de Medellín*, Vol. 8, Nú(30):11–29, 2009.
- [4] N Koshak and G Dawod. A GIS morphometric analysis of hydrological catchments within Makkah Metropolitan area , Saudi Arabia. *Journal Of Geomatics*, 2(2):544–554, 2011.
- [5] Yahya Farhan and Omar Anaba. Flash Flood Risk Estimation of Wadi Yutum (Southern Jordan) Watershed Using GIS Based Morphometric Analysis and Remote Sensing Techniques. *Open Journal of Modern Hydrology*, 06(02):79–100, 2016.
- [6] S. Bajabaa, M. Masoud, and N. Al-Amri. Flash flood hazard mapping based on quantitative hydrology, geomorphology and GIS techniques (case study of Wadi Al Lith, Saudi Arabia). *Arabian Journal of Geosciences*, 7(6):2469–2481, 2014.
- [7] PROYECTAR LTDA. Informe final amenaza por fenómenos de avenidas torrenciales Pradilla – El Triunfo. 2016.

- [8] IMA Ingeniería y Medio Ambiente. Estudios de Amenaza , Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa , Inundación , Avenida Torrencial e Incendios Forestales en los Municipios de Nemocón , Cogua , Tena , San Antonio del Tequendama y Tocaima en el Departamento de Cundinamarca. pages 1–144, 2016.
- [9] Julián Gutiérrez and Hervé Jegat. Clasificación de imágenes satelitales con coberturas mixtas: El caso urbano de Mérida, Venezuela. 30:261–266, 2005.
- [10] José Roa-Lobo and Ulrich Kamp. Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, Trujillo-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 53 (1):109–126, 2012.
- [11] IDEAM. *Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación*. 2017.
- [12] CAR. *Mapa digital integrado de las coberturas y usos de la tierra jurisdicción Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca*. 2016.
- [13] EL TIEMPO. Avalancha en Útica - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990, 2015.
- [14] Montserrat Jardí. Forma de una cuenca de drenaje. Analisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, XIX:41–68, 1985.
- [15] Germán Monsalve Sáenz. *Hidrología en la ingeniería / Germán Monsalve Sáenz*. 06 2014.
- [16] FOPAE. *Modelos conceptuales, metodologías e insumos para la definición de los indicadores de variabilidad y cambio climático, eventos torrenciales y vulnerabilidad de las infraestructuras de producción de agua*. 2014.
- [17] Salvatore Manfreda, Margherita Di Leo, and Aurelia Sole. Detection of Flood-Prone Areas Using Digital Elevation Models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(10):781–790, oct 2011.